

SURFACE TYPE LIGHT EMITTING ELEMENT

Patent Number: JP3229480
Publication date: 1991-10-11
Inventor(s): KAWAKAMI GOJI; others: 04
Applicant(s):: NIPPON TELEGR & TELEPH CORP
Requested Patent: ■ JP3229480
Application Number: JP19900024452 19900205
Priority Number(s):
IPC Classification: H01S3/18
EC Classification:
Equivalents: JP2744503B2

Abstract

PURPOSE: To apply on an InGaAsP/InP long wave light emitting element, an AlGaInP visible light element, etc., by forming the half widths of a cavity mode and an oscillating light wavelength in the same degree.

CONSTITUTION: An active region 2 is formed of a light emitting layer of an InGaAs distortion quantum well, and a GRIN (Graded Index) structure 2 of a GaAs-Al_{0.6}Ga_{0.4}As, an Al_{0.6}Ga_{0.4}As is used as a spacer, and a mirror interval is set to 1 or 1/2 wavelength. Multilayer film mirrors 3, 4 are made of $\lambda/4n$ of the Al_{0.6}Ga_{0.4}As, the antinode of a standing wave in a cavity is disposed at the center of the cavity, and a light emitting layer is disposed at the position. The cavity is all formed at $\lambda/2$ thickness of the Al_{0.6}Ga_{0.4}As. When the values of reflectivities of both sides are near, a surface type bistable logic element is used to receive a signal light from one side and to output a lasing light to the other. The reflectivities are arbitrarily so set according to the photodetecting sensitivity and light emitting output of the element that the half power width of a cavity mode and the half power width of the emitting light wavelength are formed in the same degree. When one reflectivity is set to approximately '1' and the other reflectivity is set to a value smaller than it in an asymmetrical structure, a light to be emitted toward a direction of smaller reflectivity is obtained.

Data supplied from the esp@cenet database - I2

(19)日本特許庁 (J P) (12)特許公報 (B 2)

(11)特許番号

第2744503号

(24)登録日 平成10年(1998)2月6日

(45)発行日 平成10年(1998)4月28日

(51)IntCl.⁴ H01S 3/18 P1 H01S 3/18

識別記号

請求項の数3(全4頁)

(21)出願番号	特願平2-24452	(73)特許権者	959595959 日本電信電話株式会社
(22)出願日	平成2年(1990)2月5日	(72)発明者	川上 剛司 東京都新宿区西新宿3丁目19番2号
(65)公開番号	特開平3-22480	(72)発明者	山本 喜久 東京都千代田区内幸町1丁目1番6号
(43)公開日	平成3年(1991)10月11日	(72)発明者	小暮 政 東京都千代田区内幸町1丁目1番6号
審査請求日	平成7年(1995)10月17日	(74)代理人	井理士 杉村 純秀 (外1名) 日本電信電話株式会社内
		審査官	門田 かつよ

(54)発明の名称 面形発光素子

(57)【特許請求の範囲】
【請求項1】一定の周長を持つ1組の多層膜ミラーでキャビティが形成され、該キャビティ内の定在波の波長の部分に発光層を有し、基板に垂直に発光素子またはレーザ発振する発光素子において、該キャビティモードの半値幅と発光素子の半値幅を同程度にしたことを特徴とする面形発光素子。
【請求項2】多層膜ミラーの反射率が光取り出し側で小さく、反対側で1に近いことを特徴とする請求項1に記載の面形発光素子。
【請求項3】二つの多層膜ミラーの反射率がほぼ等しく、一方から受光し他方から発光することを特徴とする請求項1に記載の面形発光素子。
【発明の詳細な説明】
(産業上の利用分野)

本発明は、基板に垂直方向に発光またはレーザ発振する面形発光素子に關し、詳しくは面形発光半導体レーザの特性改善、および微細素子作製の容易化に關するものである。
(従来の技術)
基板に垂直に発振する面形発光半導体レーザでは、キャビティ長、すなわち増幅領域が、エビ厚に対応するのミクロンオーダーであり、通常のストライプ形レーザに比べて極めて短い。このためレーザ発振を得るためには、できるだけ反射率を高めて光の内部往復を繰り返すことにより、キャビティ長を実効的に長くして、ゲインを得ていた。
第2図は、従来のGaAs系面形発光レーザの構造を示す模式的断面図であって、発光層は、GaAs基板1の上にGaAs層もしくはInGaAs層のDH(Double Hetero)構造を

たはGRIN(Graded Index)構造からなる活性領域2をもち、ミラー間隔を1波長程度とした、いわゆるマイクログリッド構造を有している。活性領域の外周のキャビティ用ミラー3は、透明であって、GaAs/AlGaAsの各々 $\lambda/4$ (λ は発光波長、 n は各屈折率)の厚さからなる半導体多層膜ミラーを使用している。AlGaAs系の屈折率 n はGaAsで約3.6、AlAsで約3.0であり、中間組成ではほぼ直線的に変化する。多層膜ミラーの反射率は、多層膜ミラーを構成する半導体層の屈折率の差 Δn が大きいほど高いので、従来の面形発光素子では、GaAs(または $\lambda \leq 0.9$)の $2Al_{0.9}Ga_{1-0.9}As$ とAlAs(または $\lambda \geq 0.9$)の $Al_{0.9}Ga_{1-0.9}As$ を用い、その層数(ペア数)は15~30が使用されている。発光層にInGaAs系量子井戸を用いた場合、発光波長は約1 μm であり、GaAs基板も透明であるので、基板側から出力を出す場合にも基板GaAsの穴開けを行う必要はない。マイクログリッド構造では、発光した光をミラー間で往復させる通常のレーザと異なり、両ミラーの反射率以外に、キャビティモードの半値幅と発光した光の半値幅が特性に關係してくる。すなわち自然放出係数 β を大きくすることが発光出力の増大および変調速度の高帯域化などに重要となる。一般にマイクログリッドの反射率とキャビティモードの半値幅とは逆比例の關係がある。従って前述の従来の面形発光半導体レーザでは、多層膜ミラーの反射率を大きくすることは光に注目していたが、キャビティモードの半値幅が光の半値幅に比べて極端に狭くなり、有効に光出力が外部に取られ出ない欠点があった。また変調速度について言えば、高反射ミラーのレーザでは、フォトリソグラフィが長くなるので、変調速度は、これにより制限があった。第3図にマイクログリッドの反射率特性を示す。

(a)は従来の面形発光半導体レーザに用いられていたもので、両多層膜ミラーが $\lambda/4n$ -GaAsと $\lambda/4n$ -AlAsの全体の反射率は $R > 99.9\%$ (各多層膜ミラーの反射率はエビ厚99.9%、基板側99.7%)、キャビティモードの半値幅 $\Delta \lambda_c$ は0.1nmである。ところが発光層がInGaAs系量子井戸層やGaAs系量子井戸層の位置における発光半値幅 $\Delta \lambda_p$ は通常5nm~15nm程度であるので、 $\Delta \lambda_c < \Delta \lambda_p$ となり、発光の大部分はキャビティ外には出ない状況となっていた。自然放出係数 β は、波長帯域 $\Delta \lambda$ の1/5~0.1/5、立体角 Ω の1/2とすると、 $\beta = 0.7 \sim 2 \times 10^{-7}$ となり、このため出力が小さく、面形半導体レーザの最大欠点となっていた。

一方、変調速度は緩和振動周波数 $f_r = (P/P_{th})^{1/2} / (r_{sp} \rho_p)^{1/2}$ で制限される。ここで、 P は注入密度、 P_{th} (発振しきい値密度)は $P_{th} = \gamma n_{sp} / \beta = n_{sp} / \beta \tau_{ph}$ ($\gamma = 1/\tau_{sp}$)は共振器の帯域幅、 n_{sp} はキャリアの反転分布係数、 τ_{ph} および τ_{sp} はそれぞれフォトンおよびキャリアのライフタイムである。高注入状態の $P > P_{th}$ では、 $f_r \approx (\beta \tau_{ph} n_{sp})^{1/2} / 2\pi$ とな

り、自然放出係数 β が小さいと高速変調に不利であった。またAl組成が100%に近いAlGaAsでは、化学的に不安定である。電子およびホール移動度が小さい、加工性が悪いなどの種々の問題があり、またエビ成長の際には良好な平坦性が得られないという困難性もあった。また反射率を高くするために多層膜のペア数を増すと、全体の厚みが厚くなり、これは微細素子の作製やシリズ抵抗の面で不利となるほか、エビ成長表面の平坦性が極めて劣化し、ミラー特性が悪くなる欠点があった。

(発明が解決しようとする課題)

本発明では、発光を有効に取り出し、またはレーザ発振に使用し、かつ変調帯域幅を拡大するため、キャビティモードの半値幅を発光した光のそれと同程度にした、面形発光素子および半導体レーザに關するものである。またAl組成が100%近傍のAlGaAsの使用を回避するものである。

(課題を解決するための手段)

本発明では、少なくとも一方の多層膜ミラーを構成する材料($\lambda/4n$)の屈折率の差を少なくするか、またはペア数を少なくし、キャビティモードの半値幅を発光した光のそれと同程度としたところが、従来の面形発光素子と異なる。

(実施例)

第1図は本発明の面形発光素子の一実施例の構造を示す模式的断面図である。活性領域はInGaAs系量子井戸(発光波長980nm)の発光層と、GaAs-Al_{0.6}Ga_{0.4}AsのRIN構造からなり、スベースにはAl_{0.6}Ga_{0.4}Asを用い、ミラーはGaAsとAl_{0.6}Ga_{0.4}Asの $\lambda/4n$ 構造からなるが、例えがミラー間隔が1/2波長の場合、スベースに接する $\lambda/4n$ 層はGaAsとし、キャビティ内の定在波の波長がキャビティの中心にくるようにし、その位置に発光層があるものとする。1波長の場合にも同様にGRIN構造およびスベースのAlGaAs組成を選び、定在波の波長がキャビティの中心にくるようにし、その位置に発光層を置く。このようにしたものに、この実施例では第3図(b)に示すように、発光層とキャビティモード幅が同程度となるよう以下のように多層膜ミラーを設定する。

表1に本発明における具体的な多層膜ミラーの構成とミラー特性の關係を、従来のものと比較して示す。多層膜ミラーの構成は、①はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、②はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、③はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、④はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、⑤はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、⑥はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、⑦はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、⑧はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、⑨はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、⑩はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、⑪はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、⑫はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、⑬はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、⑭はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、⑮はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、⑯はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、⑰はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、⑱はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、⑲はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、⑳はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㉑はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㉒はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㉓はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㉔はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㉕はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㉖はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㉗はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㉘はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㉙はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㉚はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㉛はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㉜はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㉝はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㉞はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㉟はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊱はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊲はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊳はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊴はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊵はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊶はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊷はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊸はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊹はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊺はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊻はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊼はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊽はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊾はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊿はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊰はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊱はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊲はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊳はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊴はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊵はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊶はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊷はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊸はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊹はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊺はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊻はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊼はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊽はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊾はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊿はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊰はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊱はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊲はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊳はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊴はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊵はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊶はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊷はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊸はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊹はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊺はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊻はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊼はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊽はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊾はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊿はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊰はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊱はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊲はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊳はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊴はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊵はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊶はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊷はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊸はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊹はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊺はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊻はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊼はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊽はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊾はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊿はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊰はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊱はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊲はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊳はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊴はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊵はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊶はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊷はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊸はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊹はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊺はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊻はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊼はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊽はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊾はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊿はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊰はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊱はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊲はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊳はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊴はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊵はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊶はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊷はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊸はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊹はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊺はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊻はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊼はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊽はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊾はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊿はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊰はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊱はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊲はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊳はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊴はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊵はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊶はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊷はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊸はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊹はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊺はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊻はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊼はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊽はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊾はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊿はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊰はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊱はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊲はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊳はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊴はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊵はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊶はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊷はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊸はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊹はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊺はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊻はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊼はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊽はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊾はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊿はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊰はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊱はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊲はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊳はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊴はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊵はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊶はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊷はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊸はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊹はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊺はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊻はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊼はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊽はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊾はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊿はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊰はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊱はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊲はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊳はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊴はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊵はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊶はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊷はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊸はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊹はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊺はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊻はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊼はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊽はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊾はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊿はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊰はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊱はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊲はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊳はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊴はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊵はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊶はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊷はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊸はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊹はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊺はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊻はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊼はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊽はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊾はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊿はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊰はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊱はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊲はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊳はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊴はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊵はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊶はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊷はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊸はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊹はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊺はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊻はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊼はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊽はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊾はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊿はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊰はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊱はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊲はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊳はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊴はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊵はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊶はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊷はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊸はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊹はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊺はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊻はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊼はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊽はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊾はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊿はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊰はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊱はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊲はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊳はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊴はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊵はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊶はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊷はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊸はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊹はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊺はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊻はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊼はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊽はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊾はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊿はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊰はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊱はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊲はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊳はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊴はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊵はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊶はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊷はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊸はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊹はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊺はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊻はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊼はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊽はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊾はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊿はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊰はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊱はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊲はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊳はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊴はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊵はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊶はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊷はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊸はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊹はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊺はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊻はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊼はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊽はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊾はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊿はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊰はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊱はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊲はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊳はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊴はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊵はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊶はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊷はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊸はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊹はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊺はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊻はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊼はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}As、㊽はGaAs/Al_{0.6}Ga_{0.4}

